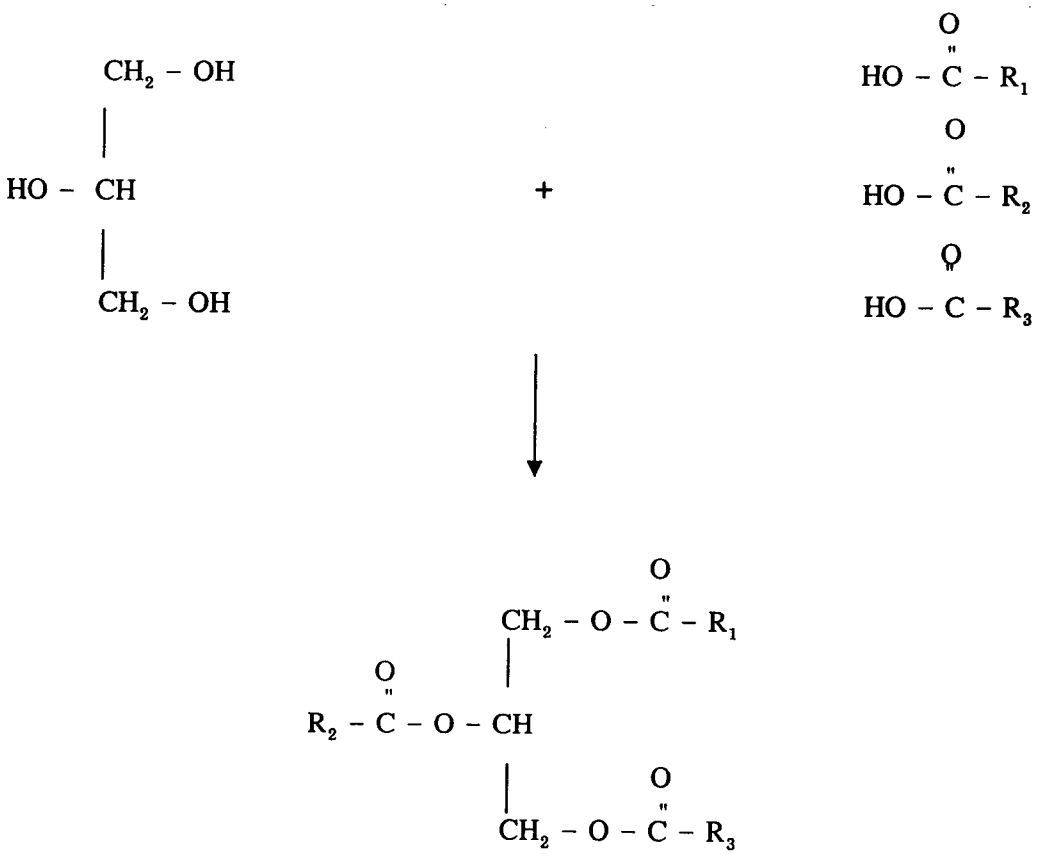
บทที่ 2
ตรวจเอกสาร

2.1 ความสำคัญของไขมันในอาหารสุกร

ไขมัน (Fat) หรือ น้ำมัน (Oil) เป็นวัตถุดิบอาหารสุกรที่สำคัญชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติคือ ไม่ละลายน้ำ (Hydrophobic) แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ (Ether) และคลอโรฟอร์ม (Chloroform) ไขมันเกิดจากการรวมตัวระหว่างกรดไขมัน (Fatty acid) กับกลีเซอรอล (Glycerol) เรียกว่า ไทรเอซิลกลีเซอรอล (Triacylglycerol) (Mayes, 1988) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ไขมันเป็นแหล่งพลังงานระดับสูงในอาหาร เป็นตัวทำละลายวิตามินที่ละลายในไขมัน เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ เป็นองค์ประกอบในเซลล์ของเนื้อเยื่อประสาท นอกจากนี้ยังเป็นสารตั้งต้นในการผลิตฮอร์โมนเพื่อการเจริญเติบโต (Granner, 2003; Mathews et al., 2003; McKee and McKee, 2003)



ภาพที่ 2-1 สูตรโครงสร้างของไทรเอซิลกลีเซอรอล (Triacylglycerol)
ที่มา: Mayes (1988)

2.1.1 องค์ประกอบของไขมัน

ไขมันประกอบด้วยกรดไขมันต่าง ๆ ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ตามชนิดของไขมันนั้น ๆ สามารถจำแนกกรดไขมันได้ ตามคุณสมบัติของสายไฮโดรคาร์บอน (Mathews et al., 2000) ดังแสดงในตารางที่ 2-1 จะเห็นได้ว่าน้ำมันถั่วเหลืองเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบของกรดลิโนเลอิกอยู่สูง (NRC, 1998) เมื่อเทียบกับไขมันชนิดอื่น เช่น ไขวัว เป็นต้น กรดลิโนเลอิกมีความสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึมในร่างกาย เป็นสารตั้งต้นในการสร้างกรดอะราชิโดนิก เพื่อผลิตฮอร์โมนพรอสตาแกลนดิน มีบทบาทในการออกฤทธิ์ของฮอร์โมนเพื่อการเจริญเติบโต (Nelson and Cox, 2005)

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบของกรดไขมันจากไขมันชนิดต่าง ๆ

แหล่งไขมัน	กรดไขมัน, ร้อยละ							
	14:0	16:0	16:1	18:0	18:1	18:2	18:3	≥20:0
น้ำมันไก่[1]	0.9	21.6	5.7	6.0	37.3	19.5	1.0	-
น้ำมันหมู[2]	1.6	22.8	3.0	14.0	45.6	12.0	0.1	-
ไขวัว[3]	3.6	28.4	2.5	21.8	40.8	2.1	0.5	0.3
น้ำมันปลา[4]	4.8	11.1	7.2	1.0	12.8	1.0	0.6	14.2
น้ำมันทานตะวัน[5]	-	20.6	0.8	4.6	19.5	52.5	0.2	-
น้ำมันเรปซีด[6]	0.4	12.9	0.4	2.9	42.9	34.5	5.2	-
น้ำมันข้าวโพด[7]	-	10.3	0.1	1.9	33.1	52.0	1.2	-
น้ำมันถั่วเหลือง[1]	0.1	10.3	0.2	3.8	22.8	51.0	6.8	0.2
น้ำมันรำข้าว[5]	0.8	17.7	0.2	2.2	40.6	35.6	1.8	-
น้ำมันเมล็ดฝ้าย[5]	1.2	20.6	0.8	4.6	19.5	52.5	0.2	-
น้ำมันปาล์ม[5]	1.1	40.2	0.4	4.5	43.3	9.0	1.0	-
น้ำมันมะพร้าว[1]	16.8	8.2	-	2.8	5.8	1.8	-	-

ที่มา: [1] NRC (1998)

[2] Ketals and De Groote (1989)

[3] Reis de Souza et al. (1995)

[4] Bryhni et al. (2002)

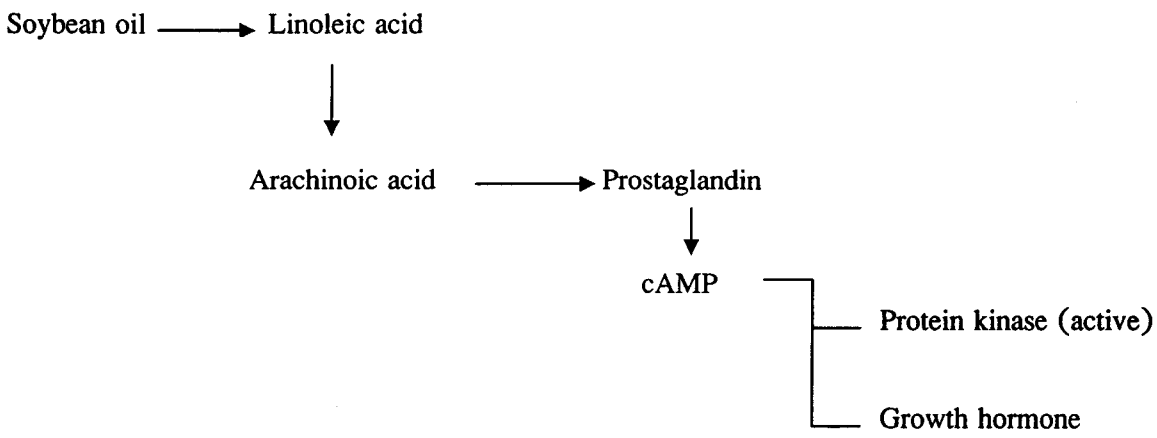
[5] Zullaikah et al. (2005)

[6] Hrdinka et al. (1996)

[7] Rentfrow et al. (2003)

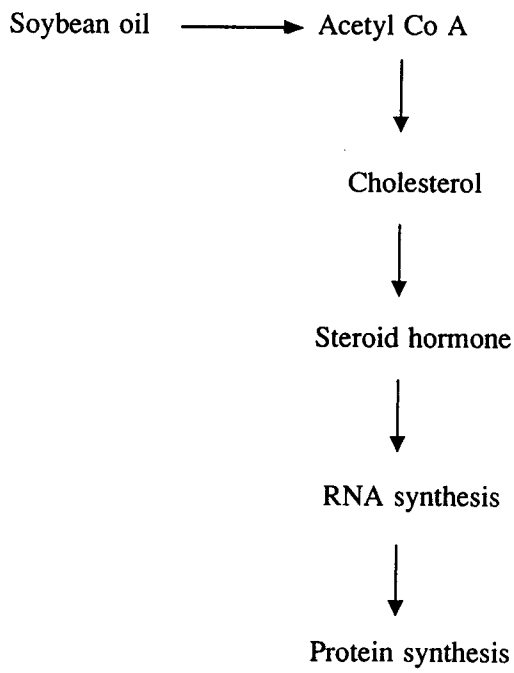
2.1.2 บทบาทของน้ำมันถั่วเหลืองในอาหารสุกร

น้ำมันถั่วเหลือง ไม่ได้เป็นเพียงวัตถุดิบอาหารในด้านการให้พลังงานเพียงอย่างเดียว Martin et al. (1981) รายงานว่าไขมันทำหน้าที่ในการละลายวิตามินที่ละลายในไขมัน (Fat soluble vitamin) ได้แก่ วิตามิน เอ ดี อี และเค อีกทั้งยังเป็นแหล่งของกรดไขมันบางชนิดที่จำเป็นต้องมีในอาหารตามธรรมชาติ ในร่างกายไขมันเป็นแหล่งของพลังงานที่มีประสิทธิภาพสามารถเก็บไว้ในเนื้อเยื่อไขมัน (Adipose tissue) ในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นใต้ผิวหนัง ซึ่งมีคุณสมบัติในการให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย เป็นเยื่อหุ้มเซลล์หรือฉนวน (Insulator) ป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากร่างกาย แสดงให้เห็นว่าไขมันจะช่วยลดการเผาผลาญพลังงานในร่างกายทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโต (Pond and Maner, 1974) และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไขมันยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของสมองอีกด้วย โดยการรวมตัวกันของไขมันกับโปรตีนได้เป็นไลโพโปรตีน (Lipoprotein) จะเป็นส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่ภายในไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) ไขมันที่สัตว์ได้รับจะถูกเก็บไว้ในเนื้อเยื่อไขมันที่บริเวณใต้ผิวหนัง และส่วนที่เหลือจะอยู่บริเวณรอบ ๆ โดยเฉพาะตับ ทางเดินอาหาร และระหว่างกล้ามเนื้อ ระดับของไขมันที่ใช้เลี้ยงสัตว์ ถ้าไม่มีความเหมาะสมจะก่อให้เกิดการสะสมไขมันในร่างกายสัตว์ (Marbray and Waldroup, 1981; Martin et al., 1981) NRC (1998) รายงานว่าในน้ำมันถั่วเหลือง มีปริมาณกรดลิโนเลอิกอยู่สูง ซึ่งกรดไขมันชนิดนี้เป็นสารตั้งต้น ในการสังเคราะห์กรดอะราชิโดนิก มีบทบาทเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ฮอร์โมนพรอสตาแกลนดิน ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่มีบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของไซคลิก เอเอมพี ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการออกฤทธิ์ของฮอร์โมน เพื่อการเจริญเติบโต และกระตุ้นการทำงานของเอ็นไซม์โปรตีนไคเนสให้ดีขึ้น คือ ทำให้เอ็นไซม์ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ทำงานเปลี่ยนเป็นรูปที่ทำงานได้ เอ็นไซม์โปรตีนไคเนสเป็นเอ็นไซม์ที่เร่งการเติมหมู่ฟอสเฟตเข้ากับโปรตีนต่าง ๆ (Gurr et al., 2002) ความเชื่อมโยงสามารถอธิบายได้ดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ของน้ำมันถั่วเหลืองกับฮอร์โมนเพื่อการเจริญเติบโต

นอกจากนี้เมื่อกรดไขมันสลายตัวเป็นอะเซทิล โค เอ ยังเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสเตอรอยด์ฮอร์โมน เช่น ฮอร์โมนจากต่อมหมวกไต (กลูโคคอร์ติคอยด์, มิเนอรอลโล-คอร์ติคอยด์) ฮอร์โมนเพศ (แอนโดรเจน, เอสโตรเจน และโปรเจสเตอโรน) (Binkley, 1995) แม้ฮอร์โมนเหล่านี้จะมีฤทธิ์แตกต่างกัน แต่มีกลไกการออกฤทธิ์ร่วมกัน คือ ชักนำให้มีการสังเคราะห์อาร์เอ็นเอ (RNA) เพิ่มขึ้นที่ระดับนิวเคลียส ฮอร์โมนพวกนี้มีสมบัติละลายได้ดีในไขมันสามารถซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปในไซโตพลาสซึมและเข้าไปจับกับตัวรับซึ่งเป็นโปรตีน ได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนของตัวรับกับสเตอรอยด์ (Receptor-steroid complex; RS) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนของตัวรับกับสเตอรอยด์จะผ่านเข้าไปในนิวเคลียส เพื่อจับกับโปรตีนที่ตำแหน่งตัวรับ (Acceptor site) บนดีเอ็นเอ (DNA) และส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของจีน (Gene) ทำให้มีการสังเคราะห์เอ็มอาร์เอ็นเอเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้มีการสังเคราะห์โปรตีนเพิ่มขึ้น (บังอร, 2543) ความเชื่อมโยงสามารถอธิบายได้ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 บทบาทของน้ำมันถั่วเหลืองในการสังเคราะห์โปรตีน

2.1.3 ระดับไขมันในอาหารสุกร

สุกรมีความต้องการไขมันเพื่อใช้เป็นเยื่อหุ้มเซลล์ และองค์ประกอบในเซลล์ของเนื้อเยื่อประสาท (Nelson and Cox, 2000) นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งพลังงานระดับสูงในอาหาร (NRC, 1998) จากการรายงานของ De la Llata et al. (2001) ทำการศึกษาผลของไขมันในอาหารต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต และลักษณะซากในสุกรรุ่น-ขุนที่เลี้ยงในสภาพแวดล้อมทางการค้า โดยมีไขมัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 พบว่าสุกรมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มต่อปริมาณอาหารที่กินเพิ่มขึ้นเมื่อสุกรได้รับอาหารที่มีระดับไขมันในอาหารเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 336, 347, 363 และ 378 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ตามลำดับ สอดคล้องกับงานทดลองที่ทำการศึกษาผลของไขวัว และไขมันไก่ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต ซาก เนื้อแดง และคุณภาพเนื้อ ในสุกรรุ่นขุน ของ Engel et al. (2001) โดยใช้ไขมัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ พบว่าสุกรมีอัตราการเจริญเติบโต น้ำหนักตัวที่เพิ่มต่อปริมาณอาหารที่กิน(310, 300, 320 และ 300 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร) เพิ่มขึ้น เมื่อสุกรได้รับอาหารที่มีระดับไขมันในอาหารเพิ่มขึ้น และจากงานทดลองของ Baidoo et al. (1996) ทำการศึกษาเปรียบเทียบระดับพลังงานย่อยได้ของน้ำมันคาโนลาในสุกรรุ่น โดยเสริมไขมันจากน้ำมันคาโนลา 4 ระดับ คือ ร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 ซึ่งทำให้ในอาหารทดลองทั้ง 4 สูตร มีระดับไขมันอยู่ร้อยละ 3, 6, 9 และ 11 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเมื่อสุกรได้รับอาหารที่มีระดับไขมันในอาหารเพิ่มขึ้น ในระดับร้อยละ 3 และ 6 และลดลงเมื่อระดับไขมันในอาหารเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 9 และ 11 เนื่องจากปริมาณอาหารที่กินลดลง

2.2 เมแทบอลิซึมของไขมัน

2.2.1 กระบวนการย่อยและการดูดซึมไขมันของสุกร

เมื่อไขมันถูกย่อย เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล จะถูกดูดซึมเข้าสู่เยื่อบุเซลล์ผนังลำไส้เล็ก (Mucosa cell) ซึ่งกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำกว่า 12 อะตอม จะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดโดยตรง ส่วนกรดไขมันที่มีจำนวนมากกว่า 12 อะตอม ขึ้นไปจะอยู่ในรูปไมเซลล์ผสม และถูกดูดซึมเข้าสู่เยื่อบุผนังลำไส้เล็ก ส่วนกลีเซอรอลจะขนย้ายไปยังตับ และถูกเปลี่ยนเป็นกลีเซอรอลดีไฮด์ไตรฟอสเฟต (Glyceraldehydes-3-phosphate) เป็นสารตัวกลางในวิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis) (Murray et al., 2000) หลังจากดูดซึมแล้ว กรดไขมัน และกลีเซอรอลจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว เป็นไทรเอซิลกลีเซอรอลอีกครั้งหนึ่ง และรวมตัวกับคอเลสเทอริลเอสเทอร์ ฟอสโฟลิปิด และโปรตีน ได้เป็นไลโพโปรตีน ชนิดไคโลไมครอน (Chylomicron) จากนั้นจะเข้าสู่ระบบน้ำเหลือง แล้วเข้าสู่กระแสเลือด และไคโลไมครอน จะถูกนำไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ ได้แก่ ตับ กล้ามเนื้อ และเนื้อเยื่อไขมัน ที่เส้นเลือดฝอยของเนื้อเยื่อเหล่านี้จะมีเอ็นไซม์ ไลโพโปรตีนไลเปส (Lipoprotein lipase) ช่วยย่อยไทรเอซิลกลีเซอรอล ให้กลับเป็นกรดไขมัน และกลีเซอรอลอีกครั้งหนึ่ง โดยกรดไขมันจะซึมเข้าสู่เซลล์ เพื่อนำไปสลายต่อที่

ไมโตคอนเดรีย (Mytochondria) เพื่อให้ได้พลังงาน หรือนำไปเก็บไว้ในรูปไทรเอซิลกลีเซอรอล (Nelson and Cox, 2005)

2.2.2 การสังเคราะห์ไขมันในร่างกายสุกร

กรดไขมันในไซโตพลาสซึมของเซลล์ตับมีเมแทบอไลต์ได้ 2 ทิศทาง คือ นำไปสังเคราะห์เป็นไทรเอซิลกลีเซอรอล และฟอสโฟลิปิด ในไซโตพลาสซึม อีกทิศทาง คือ นำไปสลายเป็นพลังงาน โดยวิถีเบตาออกซิเดชัน (β-oxidation) ในไมโตคอนเดรีย การที่กรดไขมันจะถูกนำไปใช้ในทางใดทางหนึ่งนั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะของเซลล์ในขณะนั้น (Murray et al., 2000) เช่น ในสภาวะที่ร่างกายขาดพลังงาน กรดไขมันจะถูกขนส่งเข้าไปในไมโตคอนเดรียในรูปของแฟตตีเอซิล โค เอ (Fatty acyl-Co A) เข้าสู่วิถีเบตาออกซิเดชัน ได้ผลผลิตเป็นอะเซทิล โค เอ เข้าสู่วัฏจักรเครปส์ (Krebs cycle) และได้พลังงานออกมา หรืออะเซทิล โค เอ อาจถูกเปลี่ยนเป็นคีโทนบอดี (Ketone body) เพื่อนำออกนอกเซลล์ตับ และส่งไปตามกระแสเลือดเพื่อนำไปใช้ในเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของร่างกาย ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารให้พลังงานแก่เนื้อเยื่อเหล่านั้น ในสภาวะที่ร่างกายมีพลังงานเพียงพอตามความต้องการ จะมีการสังเคราะห์ไขมันมากขึ้น ทำให้มีมาโลนิล โค เอ (Malonyl-Co A) มากขึ้นด้วย มาโลนิล โค เอ จะไปยับยั้ง เอ็นไซม์คาร์นิทีนเอซิลทรานเฟอเรส I (Carnitine acyl tranferase I) ไม่ให้ทำหน้าที่ขนส่งแฟตตีเอซิล โค เอ เข้าสู่ไมโตคอนเดรีย ทำให้ไม่เกิดการสลายไขมัน (Montgomery et al., 1996; Boyer, 1999)

ในการสังเคราะห์กรดไขมันประกอบด้วยปฏิกิริยา 4 ขั้นตอน เมื่อต้องการให้สายของกรดไขมันยาวขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอีกรอบหนึ่ง นั่นคือ จะมีการเติมคาร์บอนทีละ 2 อะตอมต่อรอบ โดยมีมาโลนิล โค เอ เป็นตัวให้คาร์บอน แต่ข้อจำกัด คือ สามารถสังเคราะห์กรดไขมันได้ความยาวสูงสุดแค่ 16 คาร์บอน ถ้าต้องการกรดไขมันที่แตกต่างไปจากนี้ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงต่อไปอีก การเพิ่มความยาวของกรดไขมันให้สายยาวเกินกว่า 16 คาร์บอน เกิดขึ้นที่ไมโครโซม (Microsome) โดยวิธีที่แตกต่างไปจากการสังเคราะห์กรดไขมันที่ได้กล่าวไว้ ระบบนี้เรียกว่า ไมโครโซมอล เชนอิลองเกชัน (Microsomal chainelongation) ซึ่งจะมีการเติมคาร์บอนเข้าไปทีละ 2 อะตอม และตัวที่ให้หมู่อะเซทิล คือ มาโลนิล โค เอ และมีนิโคทินาไมด์ อะดีนีน ไดนิวคลีโอไทด์ ฟอสเฟต ไฮโดรเจน (Nicotinamine adenine dinucleotide phosphate hydrogen, NADPH) เป็นตัวให้อะตอมไฮโดรเจน (Montgomery et al., 1996)

สำหรับการเติมพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมันเกิดขึ้นที่ไมโครโซม โดยใช้ระบบเอ็นไซม์ไมโครโซมอลดีแซทเทอ (Microsomal desature) ปฏิกิริยานี้มีการใช้ออกซิเจน และ NADPH หรือนิโคทินาไมด์ อะดีนีน ไดนิวคลีโอไทด์ ไฮโดรเจน (Nicotinamine adenine dinucleotide hydrogen, NADH) การสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะ จะเป็นการเพิ่มพันธะคู่เข้าไปในโมเลกุลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เดิมมีพันธะคู่อยู่แล้ว ซึ่งหลังจากเติมพันธะจะต้องมีหมู่เมทิลีนคั่นระหว่างพันธะคู่ ในการเติมพันธะคู่ มีปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องหลายปัจจัย เป็นต้นว่า สภาวะการได้รับอาหาร ชนิดของกรดไขมันที่ได้รับ และฮอร์โมน

(Phetteplace, 1992) โดยพบว่า ในสภาวะที่สัตว์ได้รับอาหารไม่เพียงพอการทำงานของเอ็นไซม์ดีแซทเทอ (Desature) จะลดลง (Montgomery et al., 1996; Hames et al., 1997)

เมื่อสัตว์ได้รับอาหารที่มีพลังงานมากเกินพอ สำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของร่างกาย สัตว์จะมีการนำพลังงานที่เหลือไปเก็บสะสมไว้ในรูปไทรเอซิลกลีเซอรอล โดยการสังเคราะห์ไทรเอซิลกลีเซอรอล มีสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คือ กรดไขมัน และกลีเซอรอล ซึ่งจะถูกกระตุ้นโดยเอ็นไซม์กลีเซอรอล ไคเนส (Glycerol kinase) และอะดีโนซีน ไตรฟอสเฟต (Adinosine-3-phosphate, ATP) ให้ได้เป็นกลีเซอรอลไตรฟอสเฟต (Glycerol-3-phosphate) ในเนื้อเยื่อที่ไม่มีเอ็นไซม์กลีเซอรอลไคเนส เช่น กล้ามเนื้อ และเนื้อเยื่อไขมันจะใช้ ไดไฮดรอกซี อะซิโทน ฟอสเฟต (Dihydroxy acetone phosphate) จากวิถีไกลโคไลซิสมาทำปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้เอ็นไซม์กลีเซอรอลไตรฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส (Glycerol-3-phosphate dehydrogenase) ส่วนกรดไขมันจะถูกกระตุ้นให้อยู่ในรูปของแฟตตีเอซิล โค เอ โดยเอ็นไซม์ไตรโอไคเนส (Thiokinase) (Voet and Voet, 1995)

ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทรเอซิลกลีเซอรอล คือมีการต่อโมเลกุลของกรดไขมัน 2 โมเลกุล เข้าที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของกลีเซอรอลไตรฟอสเฟต ได้เป็น กรดฟอสฟาทิดิก (Phosphatidic acid) ต่อมาจะสลายเอาหมู่ฟอสเฟต โดยอาศัยน้ำย่อยฟอสฟาทิดิก แอซิด ฟอสฟาเทส (Phosphatidic acid phosphatase) ได้เป็น 1,2-ไดเอซิลกลีเซอรอล (1,2-Diacylglycerol) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไทรเอซิลกลีเซอรอล โดยมีการเติมกรดไขมันเข้าไปอีก 1 โมเลกุล เมื่อเสร็จสิ้นขบวนการดังกล่าวแล้ว ไทรเอซิลกลีเซอรอลก็จะถูกนำไปสะสมตามเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ช่องท้อง กล้ามเนื้อ และตับ เป็นต้น (Voet and Voet, 1995)

2.2.3 กระบวนการย่อยสลายไขมันเพื่อเป็นพลังงาน

การสะสมพลังงานของสุกรเกิดจากการได้รับพลังงานจากอาหาร โดยเก็บสะสมไว้ในรูปไทรเอซิลกลีเซอรอล การสะสมไทรเอซิลกลีเซอรอลส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นที่บริเวณช่องท้อง โดยที่กรดไขมันที่สะสมจะมีทั้งกรดไขมันที่อิ่มตัว และกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว (Scott et al., 1982) กระบวนการสลายกรดไขมันเพื่อเป็นพลังงานในร่างกาย เกิดขึ้นที่ไมโตคอนเดรีย โดยวิถีเบตาออกซิเดชัน ซึ่งเมื่อสิ้นสุดกระบวนการแล้วจะได้พลังงานออกมา (Murray et al., 2000) ก่อนที่กรดไขมันจะเข้าสู่ไมโตคอนเดรียจะต้องมีกระบวนการลำเลียงกรดไขมันจากไซโตพลาสซึมเข้าสู่ไมโตคอนเดรีย โดยกรดไขมันจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแฟตตีเอซิลโคเอ แล้วถูกลำเลียงเข้าสู่ภายในไมโตคอนเดรีย โดยมีคาร์นิทีน (Carnitine) เป็นตัวพา (Lehninger et al., 1995; Montgomery et al., 1996; Boyer, 1999)

ปฏิกิริยาในการสลายกรดไขมันที่เกิดขึ้น จะได้เป็นอะเซทิล โค เอ ออกมา 1 โมเลกุล นอกจากนี้ยังมีการดึงอะตอมของไฮโดรเจนออกมา 4 อะตอม และเก็บไว้ในรูปของ NADH และฟลาวิน อะดีนีน ไดนิวคลีโอไทด์ ไฮโดรเจน (Flavin adenine dinucleotide hydrogen, $FADH_2$) อย่างละ 1 โมเลกุล ต่อปฏิกิริยาหนึ่งรอบ จนในที่สุดกรดไขมันจะถูก

สลายไปจนหมด เมื่อได้อะเซทิล โค เอ, NADH และ $FADH_2$ ออกมาอย่างละ 1 โมเลกุลแล้ว อะเซทิล โค เอ จะเข้าสู่วัฏจักรเครปส์ และให้พลังงานเท่ากับ ATP 12 โมเลกุล ส่วน NADH และ $FADH_2$ จะเข้าสู่กระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน เกิดปฏิกิริยาออกซิเดทีฟฟอสโฟรีเลชัน (Oxidative phosphorylation) ให้พลังงานเท่ากับ ATP 2 และ 3 โมเลกุล ตามลำดับ (Lehninger et al., 1995)

การสลายกรดไขมันที่มีพันธะคู่ หรือกรดไขมันอิ่มตัว จะถูกสลายโดยวิถีเบตาออกซิเดชัน เช่นเดียวกับกรดไขมันที่มีพันธะเดี่ยว หรือกรดไขมันอิ่มตัว เมื่อสลายกรดไขมันจนถึงตำแหน่งที่มีพันธะคู่ ซึ่งมักจะอยู่ในรูปซิสไทรอีนอล โค เอ (Cis Δ 3 enoyl Co A) ซึ่งวิถีเบตาออกซิเดชันไม่สามารถเกิดต่อไป จะเกิดต่อไปได้โดยอาศัยเอ็นไซม์ อีนอล โค เอ ไอโซเมอเรส (Enoyl Co A isomerase) เปลี่ยนซิสไทรอีนอล โค เอให้เป็นทรานไทรอีนอล โค เอ (tran Δ 3 enoyl Co A) จะเห็นว่า การสลายพันธะคู่ของกรดไขมันไม่เกิด $FADH_2$ เนื่องจากทรานไทรอีนอล โค เอ จะเข้าสู่ช่วงกลางของวิถีเบตาออกซิเดชัน ดังนั้นจึงทำให้ขาด $FADH_2$ 1 โมเลกุล ต่อ 1 พันธะคู่ (Lehninger et al., 1995)

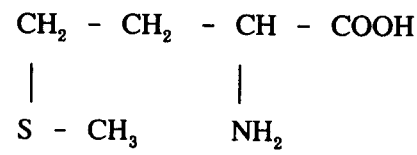
นอกจากจะพบวิถีเบตาออกซิเดชันที่ไมโตคอนเดรียแล้ว ก็สามารถเกิดได้ที่เพอร์ออกซิโซม (Peroxisome) เช่นกัน โดยเฉพาะเมื่อได้รับอาหารที่มีกรดไขมันในปริมาณมาก ๆ กรดไขมันที่นำมาสลายที่เพอร์ออกซิโซมมักมีจำนวนคาร์บอนอะตอมมาก เช่น มีจำนวนคาร์บอน 20 อะตอม ซึ่งมักพบมากในไขมันจากพืช และจากปลาทะเล (Baucell et al., 2000) เมื่อสลายแล้ว จะได้กรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนสั้น ๆ ซึ่งจะถูกนำไปสลายต่อในไมโตคอนเดรีย กลไกของปฏิกิริยาในวิถีเบตาออกซิเดชัน ที่ไมโตคอนเดรีย และเพอร์ออกซิโซมจะคล้ายคลึงกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ ปฏิกิริยาแรกที่เพอร์ออกซิโซมนั้นเอ็นไซม์ฟลาโวโปรตีน ดีไฮโดรจีเนส (Flavoprotein dehydrogenase) จะส่งอิเล็คตรอนให้กับออกซิเจน (Oxygen, O_2) แล้วได้ผลผลิตเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide) ซึ่งจะถูกเอ็นไซม์เปลี่ยนให้เป็นน้ำและออกซิเจนต่อไป (Lehninger et al., 1995)

ส่วนการสลายตัวให้พลังงานของกลีเซอรอล จะเกิดขึ้นเฉพาะในเนื้อเยื่อที่มีเอ็นไซม์กลีเซอรอลโรไคเนส (Glycerokinase) กลีเซอรอลเป็นสารที่สามารถเปลี่ยนเป็นกลูโคสได้ (Glucogenic substance) โดยสามารถเข้าวิถีไกลโคไลซิสได้ในรูปของไดไฮดรอกซีอะซิโตน (Dihydroxyacetone phosphate) และเข้าสู่วัฏจักรเครปส์ เพื่อเผาผลาญให้พลังงาน (Lehninger et al., 1995)

2.3 ความสำคัญของเมทไธโอนีนในอาหารสุกร

เมทไธโอนีนเป็นกรดอะมิโนที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group, -COOH) หมู่อะมิโน (Amino group, -NH2) อะตอมไฮโดรเจน (Hydrogen atom, -H) และหมู่อาร์ (Side chain, R) (ARC, 1981) และมีกำมะถัน (Sulfur) เป็นส่วนประกอบทางเคมี (Mathews

et al., 2000) ดังแสดงในภาพที่ 2-4 เมทไธโอนีนเป็นกรดอะมิโนที่หมู่อาร์ไม่มีขั้ว (Non polar) ไม่สามารถให้หรือรับโปรตอนได้ จึงไม่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และพันธะไอออนิก (Ionic bond) ได้ ละลายน้ำได้ไม่ดี และมักซ่อนในโมเลกุลของโปรตีนเพราะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) (Rodwell, 1993; Mathews et al., 2000; Horton et al., 2002)



ภาพที่ 2-4 สูตรโครงสร้างของแอล-เมทไธโอนีน
ที่มา: Das (1978)

ในธรรมชาติจะพบเมทไธโอนีน ในรูปแอล-เมทไธโอนีน ในการสังเคราะห์ทางอุตสาหกรรม จะได้ทั้งในรูปดีและแอล-เมทไธโอนีน ในอัตราส่วนที่เท่ากัน สุกรสามารถใช้ประโยชน์ได้ดี ทั้งในรูปดีและแอล-เมทไธโอนีน ในปริมาณที่เท่ากัน ส่วนสัตว์ปีกจะใช้ได้ดีในรูปแอล-เมทไธโอนีน แต่ใช้ดี-เมทไธโอนีนได้เพียงเล็กน้อย (สุทิศา, 2545)

เมทไธโอนีนมีความสำคัญในการสังเคราะห์โปรตีน โดยทำหน้าที่เป็นตัวแรกในการเปิดสายเปปไทด์ของกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน (Horton et al., 2002) นอกจากนี้เมทไธโอนีนยังทำหน้าที่ทดแทนสารในกระบวนการเมแทบอลิซึม โดยเมทไธโอนีนทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นหรือส่วนประกอบ ได้แก่ โฮโมซีสเตอีน (Homocysteine) ซีสตีน (Cystine) คาร์นิทีน (Carnitine) ครีเอทีน (Creatine) และโคลีน (Choline) (Rodwell, 1993)

2.3.1 แคแทบอลิซึมของเมทไธโอนีน

สัตว์ไม่สามารถสังเคราะห์เมทไธโอนีนได้ สัตว์จะได้รับเมทไธโอนีนจากอาหารเท่านั้น เมทไธโอนีนจึงจัดเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็น (Essential amino acid) เมทไธโอนีนที่ได้รับจากอาหารจะได้มาจากวัตถุดิบอาหารสัตว์ และการเสริมเมทไธโอนีนสังเคราะห์ เมทไธโอนีนที่ได้จากวัตถุดิบอาหารสัตว์จะได้มาจากพืชและสัตว์ สำหรับพืชจะสามารถสังเคราะห์เมทไธโอนีนได้เอง (Mathews et al., 2000) ส่วนเมทไธโอนีนในสัตว์ได้มาจากกล้ามเนื้อ ในการนำเมทไธโอนีนไปใช้ประโยชน์จะต้องผ่านขบวนการแคแทบอลิซึม และแอนาบอลิซึมในร่างกาย (Montgomery et al., 1990)

เมทไธโอนีนที่สัตว์ได้รับจะมีทั้งส่วนกรดอะมิโนอิสระและส่วนที่เป็นส่วนประกอบในโปรตีน เมทไธโอนีนที่เป็นส่วนประกอบในโปรตีนจะอยู่ในสายเปปไทด์ เมื่อสัตว์ได้รับโปรตีนจะเกิดกระบวนการย่อยเกิดขึ้น โดยจะเริ่มต้นกระบวนการย่อยที่กระเพาะอาหาร โดยมีเอ็นไซม์เปปซิโนเจน (Pepsinogen) และไคโมซิโนเจน (Chymosinogen) นอกจากนี้ยังอาจถูกย่อยด้วย

กรดเกลือ (HCl) โดยกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในการย่อยโปรตีนที่กระเพาะอาหาร การย่อยจะยังไม่สมบูรณ์ การย่อยจะสมบูรณ์เมื่อผ่านการย่อยที่ลำไส้เล็ก เอ็นไซม์ที่ย่อยโปรตีนในลำไส้เล็กมีหลายชนิด เอ็นไซม์ในลำไส้เล็กจะมีทั้งเอ็นไซม์ที่ลำไส้เล็กผลิตขึ้นเองและเป็นเอ็นไซม์ที่ได้รับมาจากตับอ่อน เมื่อโปรตีนถูกย่อยจนได้กรดอะมิโนอิสระ กรดอะมิโนอิสระก็จะถูกดูดซึมที่ผนังลำไส้เล็กโดย กรดอะมิโนในรูปของแอล-ไอโซเมอร์ จะถูกดูดซึมได้เร็วกว่าในรูปดี-ไอโซเมอร์ กรดอะมิโนในรูปของแอล-ไอโซเมอร์ จะถูกดูดซึมโดยวิธีแอคทีพทรานสปอร์ต (Active transport) กรดอะมิโนรูปดี-ไอโซเมอร์ ถูกดูดซึมโดยวิธีการแพร่ สำหรับเมทไธโอนีนในรูปของแอล-ไอโซเมอร์ เป็นกรดอะมิโนที่ในการดูดซึม จะต้องการโซเดียม (Na^+) และวิตามินบี 6 เป็นโคเอ็นไซม์ในกระบวนการดูดซึมด้วย หลังจากเมทไธโอนีนถูกดูดซึม จะถูกขนส่งไปยังตับสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Allen, 1977)

ในการคำนวณเมทไธโอนีน มักจะมีการคำนวณร่วมกับซีสตีน เนื่องจากเมทไธโอนีนเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีสเตอีนซึ่งเป็นกรดอะมิโนไม่จำเป็น ร่วมกับเซอรีน โดยเมทไธโอนีนเป็นตัวให้ซัลเฟอร์ และเซอรีนเป็นตัวให้ส่วนโครงคาร์บอนของซีสเตอีน ขั้นแรกเมทไธโอนีนจะถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์-อะดีโนซิลเมทไธโอนีน โดยเอ็นไซม์เมทไธโอนีนอะดีโนซิลทรานเฟอเรส โดยได้รับพลังงานจากอะดีโนซิลไตรฟอสเฟส จากนั้นจะมีการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลออกจากซัลเฟอร์-อะดีโนซิลเมทไธโอนีน กลายเป็นซัลเฟอร์-อะดีโนซิล-โฮโมซีสเตอีน จากนั้นจะมีการสลายตัวโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส ได้โฮโมซีสเตอีนและอะดีโนซีน โฮโมซีสเตอีนรวมตัวกับเซอรีนโดยมีวิตามินบี 6 เป็นโคเอ็นไซม์ได้ซีสตะไธโอนีน การสลายซีสตะไธโอนีนได้ซีสเตอีนและแอลฟา-คีโตบิวทิเรต โดยมีวิตามินบี 6 เป็นโคเอ็นไซม์ซึ่งแอลฟา-คีโตบิวทิเรตสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นโพรไพโอนิลโค เอ และซักซินิลโค เอ ตามลำดับเพื่อเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ต่อไป (Horton et al., 2002)

2.3.2 ความต้องการเมทไธโอนีนในอาหารสุกร

เมทไธโอนีนเป็นกรดอะมิโนที่สุกรต้องการ โดยเป็นกรดอะมิโนตัวแรกในการเปิดสายเปปไทด์ โดยกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน NRC (1998) อธิบายไว้ว่า สุกรน้ำหนัก 20 ถึง 50 กิโลกรัม มีความต้องการเมทไธโอนีนที่ย่อยได้จริงวันละ 4.10 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 0.22 ของอาหาร และมีความต้องการเมทไธโอนีน+ซีสตีนที่ย่อยได้จริงวันละ 8.72 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 0.47 ของอาหาร ซึ่งสุกรมีความต้องการโปรตีนในอาหารร้อยละ 18.00 Oestemer et al. (1970) รายงานการเสริมเมทไธโอนีนในอาหารที่มีส่วนประกอบเป็นข้าวโพดพันธุ์ *OPAQUE-2* ของสุกรรุ่นน้ำหนักประมาณ 21 กิโลกรัม ต้องการเมทไธโอนีน+ซีสตีนร้อยละ 0.42 ถึง 0.50 ของอาหาร ในทำนองเดียวกัน Keith et al. (1972) ได้ทำการศึกษาการหาความต้องการเมทไธโอนีน โดยให้เมทไธโอนีนเป็นตัวแทนของกรดอะมิโนที่เป็นแหล่งของกำมะถันเพียงแหล่งเดียวในสุกรรุ่นน้ำหนักประมาณ 18 กิโลกรัม โดยในอาหารมีระดับโปรตีนร้อยละ 18.39 พบว่า มีอัตราการเจริญเติบโต และน้ำหนักตัวที่เพิ่มต่อปริมาณอาหารที่กินที่ดี เมื่อมี

เมทไธโอนีนในอาหารร้อยละ 0.45 มีค่าใกล้เคียงกับคำแนะนำของ Knipfel et al. (1972) กล่าวว่า สุกรมีความต้องการเมทไธโอนีนในอาหารร้อยละ 0.48 และ 0.50 สอดคล้องกับรายงานของ Taylor et al. (1983) ที่รายงานไว้ว่า สุกรรุ่นมีความต้องการเมทไธโอนีน+ซีสตีนในอาหารร้อยละ 0.45 ส่งผลให้มีการเจริญเติบโตที่ดี

2.4 เมแทบอลิซึมของโปรตีนและกรดอะมิโน

2.4.1 กระบวนการย่อยโปรตีนและการดูดซึมกรดอะมิโนของสุกร

McDonald et al. (1995) รายงานว่า เมื่อสุกรได้รับอาหารโปรตีนเข้าสู่ร่างกาย มีการย่อยเกิดขึ้นครั้งแรกในปากโดยวิธีกล (Mechanical activities) เช่น การเคี้ยว จะทำให้อาหารมีขนาดเล็กลง สัตว์จะหลั่งน้ำลายออกมาคลุกเคล้ากับอาหาร ทำให้อาหารเปียก ลื่น เป็นก้อน กลืนได้ง่าย จากนั้นอาหารจะเคลื่อนเข้าสู่กระเพาะอาหาร จะสิ้นสุดการย่อยที่ลำไส้เล็กโดยน้ำย่อยที่หลั่งมาจากที่ต่างๆ กัน และทำหน้าที่ในการย่อยพันธะที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 น้ำย่อยที่ย่อยพันธะเปปไทด์ แหล่งผลิต สิ่งที่ถูกย่อย และผลผลิต

น้ำย่อย	แหล่งผลิต	สิ่งที่ถูกย่อย	ผลผลิต
เปปซิน	กระเพาะอาหาร	โปรตีนและเปปไทด์	เปปไทด์+กรดอะมิโน
เรนนิน	กระเพาะอาหาร	เคซีน	โปรตีนในนมตกตะกอน
ทริปซิน	ตับอ่อน	โปรตีนและเปปไทด์	เปปไทด์+กรดอะมิโน
ไคโมทริปซิน	ตับอ่อน	โปรตีนและเปปไทด์	เปปไทด์+กรดอะมิโน
คาร์บอกซี่เปปทิเดส	ตับอ่อน	โปรตีนและเปปไทด์	เปปไทด์+กรดอะมิโน
อะมิโนเปปทิเดส	ลำไส้เล็ก	เปปไทด์	กรดอะมิโน
ไดเปปทิเดส	ลำไส้เล็ก	เปปไทด์	กรดอะมิโน

ที่มา: IUBUB (1992) และ Pierzynowski et al. (1993)

การดูดซึมกรดอะมิโน แบ่งออกตามชนิดของกรดอะมิโนได้ 4 พวกใหญ่ๆ (Allen, 1977) ดังนี้

1) การดูดซึม กรดอะมิโนที่เป็นกลาง ต้องการโซเดียม (Na^+) และวิตามินบี 6 กรดอะมิโนในกลุ่มนี้มีการแข่งขันซึ่งกันและกัน และการดูดซึมไม่ถูกระงับโดยกรดอะมิโนที่เป็นด่าง กรดอะมิโนในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไกลซีน อะลานีน และเมทไธโอนีน เป็นต้น

2) การดูดซึมกรดอะมิโนที่เป็นด่าง การดูดซึมกรดอะมิโน ในกลุ่มนี้มีการแข่งขันซึ่งกันและกัน และยังถูกระงับด้วยกรดอะมิโนที่เป็นกลางด้วย กรดอะมิโนในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไลซีน และ ซีสเตอีน เป็นต้น

3) การดูดซึมกรดอะมิโนที่เป็นกรด การดูดซึมกรดอะมิโนในกลุ่มนี้จะแข่งขันกับกรดอะมิโนที่เป็นกลาง หมู่คาร์บอกซิลของกรดแอสพาติก และกลูตามิก จะถูกเปลี่ยนจากกรดเป็นเอสเทอร์ กลายเป็นกรดอะมิโนที่เป็นกลาง

4) การดูดซึมโปรลีน และไฮดรอกซีโปรลีน และไดเมทธิลไกลซีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่เป็นกลาง การดูดซึมแตกต่างจากกลุ่มแรก แต่มีความเกี่ยวพันกับวิธีการดูดซึมของกลุ่มแรก และกลุ่มที่สอง โดยมีแนวโน้มที่จะเกี่ยวพันกับกลุ่มที่สองมากกว่า

2.4.2 แคแทบอลิซึมของกรดอะมิโน

กรดอะมิโนหลังจากถูกดูดซึม และถูกขนส่งมายังตับแล้ว จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ หรือมีบทบาทต่าง ๆ (Nelson and Cox, 2005) ซึ่งได้แก่

1) ขนส่งไปยังเนื้อเยื่ออื่น ๆ กรดอะมิโนส่วนหนึ่งจะถูกขนส่ง ตามกระแสเลือดไปยังอวัยวะอื่น ๆ ซึ่งจะถูกนำไปสังเคราะห์เป็นโปรตีนของอวัยวะ หรือเนื้อเยื่อนั้น ๆ

2) นำไปสังเคราะห์โปรตีนของตับ และโปรตีนในพลาสมา โปรตีนในตับมีอัตราการเปลี่ยนแปลง (Turnover rate) ที่เร็วมาก คือ ประมาณ 2 ถึง 3 วัน จึงจำเป็นต้องมีการสังเคราะห์โปรตีนมาชดเชย นอกจากนี้ ตับยังเป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่สังเคราะห์โปรตีนในพลาสมาหลายชนิด เช่น อัลบูมิน

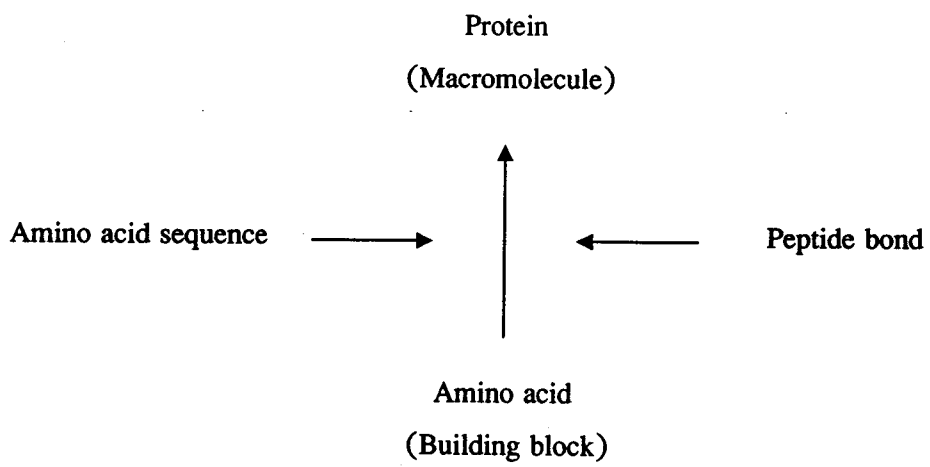
3) นำไปสลาย เพื่อให้ได้พลังงาน กรดอะมิโนที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์โปรตีน เกิดปฏิกิริยาการดึงเอาหมู่อะมิโนออกด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้เอ็นไซม์ในกลุ่มทรานส์อะมิเนส (Transaminase) หรืออะมิโน ทรานส์เฟอเรส (Amino transferase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะเข้าสู่วัฏจักรยูเรีย (Urea cycle) แล้วทำการขับยูเรียออกมาจากร่างกายทางปัสสาวะ ส่วนโครงสร้างที่เหลือ ถูกเปลี่ยนแปลงเป็นสารตัวกลางต่าง ๆ ในวัฏจักรเครปส์สามารถเปลี่ยนเป็นกลูโคสโดยวิถีกลูโคนีโอจีเนซีส (Gluconeogenesis) และเปลี่ยนเป็นไกลโคเจนโดยวิถีไกลโคจีเนซีส (Glycogenesis) หรือแม้กระทั่งเปลี่ยนเป็นไขมันเพื่อเก็บสะสมไว้ หรืออาจถูกสลายต่อไปจนสมบูรณ์ได้ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ขึ้นอยู่กับสภาวะของร่างกายหรือเซลล์ ต้องการพลังงานหรือไม่

4) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์นิวคลีโอไทด์ และสารอื่น ๆ เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เบสพิวรีน และพิริมิดีน ของนิวคลีโอไทด์ ใช้ในการสังเคราะห์พอร์ไพริน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของฮีมในฮีโมโกลบิน

2.4.3 การสังเคราะห์โปรตีน

กระบวนการสังเคราะห์โปรตีน เป็นการสร้างแมคโครโมเลกุล โดยมีหน่วยสร้าง คือ กรดอะมิโน เชื่อมต่อกันโดยพันธะเปปไทด์ ดังแสดงในภาพที่ 2-5 จากนั้นมีการดัดแปลง

และต่อเติมโมเลกุลเพื่อให้ทำหน้าที่ได้ โปรตีนแต่ละชนิดมีการจัดเรียงลำดับกรดอะมิโนแบบเฉพาะตัว เริ่มจากการแปลรหัสจากสายดีเอ็นเอ (DNA) เป็นอาร์เอ็นเอ (RNA) จนเป็นโปรตีน การถอดรหัสของเอ็มอาร์เอ็นเอ (mRNA) โดยการเรียงลำดับของเบสบนโคดอน ซึ่งแต่ละโคดอนมีเบสอยู่ 3 ตัว ซึ่งเบสแต่ละตัวไม่ซ้ำกันใน 1 โคดอน โดย U คือ เบสยูรีดีน (Uridine nucleotide) C คือ เบสไซโตซีน (Cytosine nucleotide) A คือ เบสอะดีนีน (Adenine nucleotide) และ G คือ เบสกวานีน (Guanine nucleotide) (Granner, 2003) การแปลรหัสของเอ็มอาร์เอ็นเอ เริ่มจากโคดอนเริ่มต้น (AUG) ไปสู่ปลายสุดท้ายของโคดอน (UAA, UAG, UGA) โคดอนเหล่านี้มีลำดับของโคดอนในแต่ละส่วน เป็นตัวกำหนดที่แน่นอนของกรดอะมิโน ต้องมีลำดับของกรดอะมิโนที่ถูกต้องของโปรตีนที่จะทำการสังเคราะห์ ซึ่งเมทไธโอนีนมีบทบาทในการสังเคราะห์โปรตีน โดยการแปลรหัสจากสายเบสบนสายเอ็มอาร์เอ็นเอ ซึ่งรหัสเริ่มต้นของการสร้างสายโพลิเปปไทด์คือ AUG ซึ่งเป็นรหัสของเมทไธโอนีน (Horton et al., 2002)



ภาพที่ 2-5 การสังเคราะห์โปรตีน
ที่มา: Rodwell (1993)

2.4.4 บทบาทของเมทไธโอนีนต่อการสังเคราะห์โปรตีน (Montgomery et al., 1990)

เมทไธโอนีนมีบทบาทในการสังเคราะห์โปรตีน โดยเป็นกรดอะมิโนตัวแรกในกระบวนการเริ่มต้นของการสังเคราะห์โปรตีน ดังแสดงในภาพที่ 2-6 ในโปรคาริโอตกรดอะมิโนเริ่มต้นเป็น ฟอร์มิล-เมทไธโอนีน (f Met) โดยมีทีอาร์เอ็นเอของฟอร์มิล-เมทไธโอนีน ($tRNA^{f\ Met}$) เป็นตัวพาเข้าไปยังไรโบโซมในรูปเอ็น-ฟอร์มิลเมทไธโอนิล-ทีอาร์เอ็นเอ ของฟอร์มิลเมทไธโอนีน (N-formylmethionyl-$tRNA^{f\ Met}$ หรือเขียนย่อโดย f Met-$tRNA^{f\ Met}$)

ขั้นตอนการเกิด f Met-tRNA$^{f\ Met}$ คือ เมทไธโอนีนเข้าจับกับ tRNA$^{f\ Met}$ ก่อน โดยอาศัยการทำงานของเอ็นไซม์เมทไธโอนีนอะมิโนเอซิล-ทีอาร์เอ็นเอซินเธเทส (Methionine aminoacyl tRNA synthetase) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$Met + t\,RNA^{f\ Met} + ATP \longrightarrow Met - tRNA^{f\ Met} + AMP + PPi$$

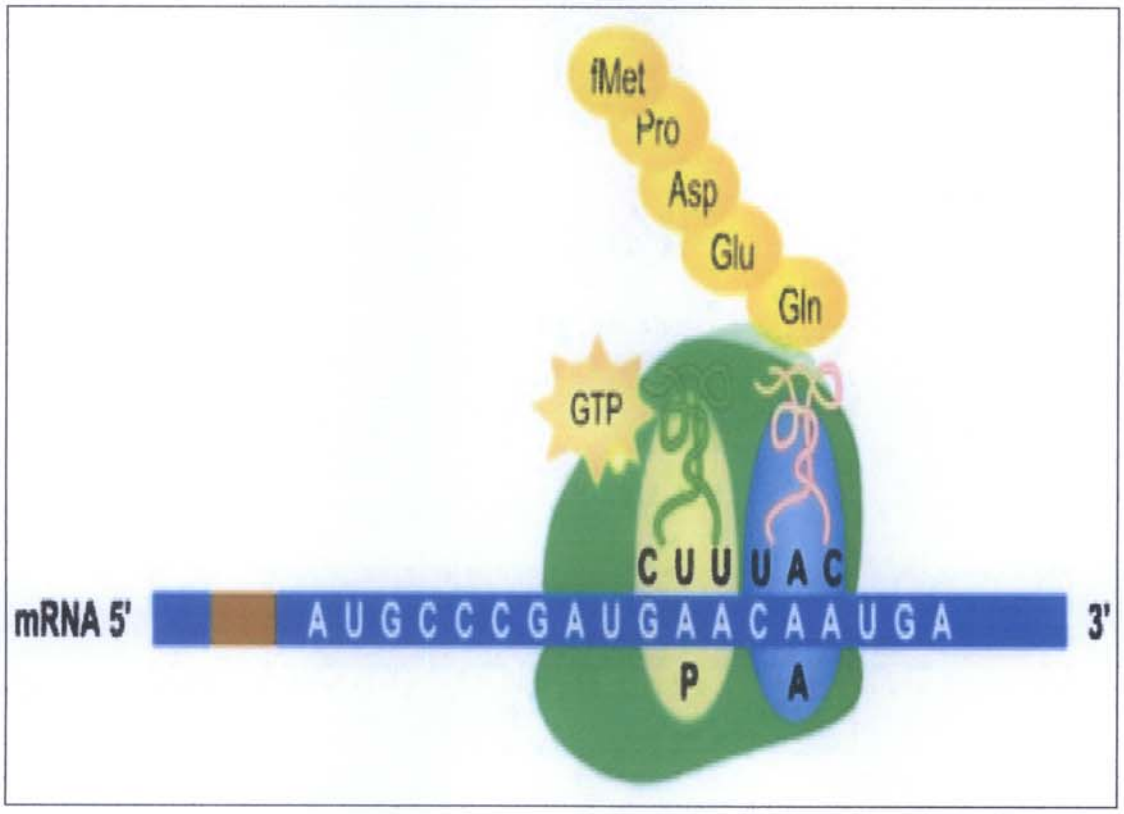
หลังจากได้ เอ็น-เมทไธโอนิล-ทีอาร์เอ็นเอ ของฟอร์มิลเมทไธโอนีน (Met- tRNA$^{f\ Met}$) แล้วเอ็นไซม์ทรานส์ฟอร์มิเลส (Transformylase) จะทำหน้าที่ย้ายหมู่ฟอร์มิลจากเอ็นเธน-ฟอร์มิเต-ตระไฮโดรโฟเลท (N^{10}-formyltetrahydrofolate หรือ N^{10}-formyl-FN_4) มาให้หมู่อะมิโนของ เมทไธโอนีน ใน Met-tRNA$^{f\ Met}$ ได้เป็น f Met-tRNA$^{f\ Met}$ ดังนี้

$$N^{10} - formyl - FN_4 + Met + tRNA^{f\ Met} \longrightarrow FN_4 + f\,Met - tRNA^{f\ Met}$$

เอ็นไซม์ทรานส์ฟอร์มิเลส มีความจำเพาะสูงมาก จะไม่เติมหมู่ฟอร์มิลให้แก่เมทไธโอนีนอิสระแต่จะเติมให้กับ Met-tRNA$^{f\ Met}$ เท่านั้น เพราะฉะนั้นในเซลล์พวกโปรคาริโอตมีทีอาร์เอ็นเอ สำหรับเมทไธโอนีนอยู่ 2 ชนิด คือ ที tRNA$^{f\ Met}$ และทีอาร์เอ็นเอของเมทไธโอนีน โดยทั้งคู่สามารถจับกับเมทไธโอนีนได้ แต่มีเฉพาะ Met-tRNA$^{f\ Met}$ เท่านั้นที่จะถูกเปลี่ยนเป็น f Met-tRNA$^{f\ Met}$ ซึ่งเป็นกรดอะมิโนเริ่มต้นในการสังเคราะห์โปรตีน ส่วนทีอาร์เอ็นเอของเมทไธโอนีน มีไว้เพื่อพาเมทไธโอนีนเข้าไปยังตำแหน่งในสายโพลิเปปไทด์ (Lehninger, 1982; Montgomery et al., 1990)

ในยูคาริโอต โปรตีนที่สร้างในไซโตพลาสซึม เมทไธโอนีนถูกนำเข้าไปยังไรโบโซมในรูป Met-tRNA$^{f\ Met}$ ส่วนโปรตีนที่ถูกสร้างขึ้นในไมโตคอนเดรีย และคลอโรพลาสของเซลล์ยูคาริโอต มีกรดอะมิโนเริ่มต้นเป็น Met-tRNA$^{f\ Met}$ จับที่ตำแหน่ง P (Peptidyl site) ส่วนอะมิโน อะซิล ทีอาร์เอ็นเอ (Amino acyl-tRNA) อื่นๆ จับที่ตำแหน่ง A (Aminoacyl site) (Davlin, 1997)

จากนั้นจะมีการเพิ่มความยาวของสายโพลิเปปไทด์ โดยการเติมกรดอะมิโนตัวอื่นๆ เพื่อให้สายโพลิเปปไทด์ยาวขึ้น ซึ่งหากสายโพลิเปปไทด์มีรหัสของกรดอะมิโนชนิดใดมากก็ย่อมมีความต้องการกรดอะมิโนชนิดนั้นมากขึ้นตามลำดับ และเมื่อเติมกรดอะมิโนตัวสุดท้ายแล้ว (รหัสยุติคือ UAA, UAG, UGA) การสังเคราะห์โปรตีนจึงยุติลง (Rodwell, 1993)



ภาพที่ 2-6 บทบาทของเมทไธโอนีนในการสังเคราะห์โปรตีน
ที่มา: Das et al. (2006)

2.5 การประเมินคุณภาพโปรตีน

คุณภาพของโปรตีนจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ สัดส่วน การย่อยได้ และการนำไปใช้ประโยชน์ได้ของกรดอะมิโนที่ประกอบอยู่ในโปรตีนนั้น ๆ ดังนั้น การประเมินคุณภาพของโปรตีนจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็น

2.5.1 ไอเดียลโปรตีน (Ideal protein)

โปรตีนที่มีความสมดุลของกรดอะมิโน หรือไอเดียลโปรตีน คือ โปรตีนที่มีดุลยภาพของกรดอะมิโนสมบูรณ์ มีชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ เพียงพอ ไม่มีกรดอะมิโนชนิดใดขาดหรือมากเกินพอ การประเมินคุณภาพโปรตีนต้องทราบรูปแบบกรดอะมิโน ของไอเดียลโปรตีน เพื่อใช้ประเมินคุณภาพโปรตีน Wang and Fuller (1990) นิยามไอเดียลโปรตีนว่า เป็นตัวแทนของกรดอะมิโนรวม หรือโปรตีนที่ถูกดูดซึม หรือมีการใช้ประโยชน์ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งหมายถึงมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่ตรงกับความต้องการของสุกร เพื่อใช้ในการดำรงชีพและเพื่อการเจริญเติบโต สาโรช (2547) ได้อธิบายว่าสัดส่วนของกรดอะมิโน ในไอเดียลโปรตีนเป็นสัดส่วนที่เน้นถึงปริมาณกรดอะมิโนที่สัตว์ใช้ได้จริง (Bioavailable) แต่ในการวัดปริมาณกรดอะมิโนที่สัตว์ใช้ได้จริงในระดับเนื้อเยื่อทำได้ยาก ค่าที่ใช้จึงยึดระดับของกรดอะมิโนที่ถูก

ดูดซึมได้จริง เมื่ออาหารผ่านมาถึงลำไส้เล็กส่วนปลาย (True ileal digestibility) แต่ไม่ใช่กรดอะมิโนที่เข้าสู่ปฏิกิริยาจริงในกระบวนการเมแทบอลิซึมทั้งหมด เพราะกรดอะมิโนที่ถูกดูดซึมบางส่วนอาจไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ จึงเป็นค่าที่บ่งชี้ที่ใกล้เคียงการใช้ประโยชน์ได้จริงเท่านั้น Cole (1979) รายงานว่า สุกรมีความต้องการปริมาณโปรตีนไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความแตกต่างในด้านเพศ พันธุ์ น้ำหนักตัว และอัตราการเจริญเติบโตในช่วงต่าง ๆ วิธีการศึกษาไอเดียลโปรตีนมีวิธีการศึกษา 4 วิธี (Boisen, 2003) ดังนี้

1) การวิเคราะห์รูปแบบ หรือระดับของกรดอะมิโนในอาหาร ซึ่งทำให้เกิดสมรรถนะการเจริญเติบโตสูงสุด

2) การวิเคราะห์รูปแบบ หรือระดับกรดอะมิโนในเนื่อเยื่อร่างกาย

3) การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของกรดอะมิโนในอาหาร เพื่อทำการสะสมไนโตรเจนในร่างกายมากที่สุด มี 2 วิธีย่อย คือ การเติมกรดอะมิโนลงในอาหารที่มีรูปแบบกรดอะมิโนพื้นฐาน และการลดปริมาณกรดอะมิโนลงในอาหารที่มีรูปแบบกรดอะมิโนพื้นฐาน

4) การวัดความต้องการกรดอะมิโน เพื่อการสะสมโปรตีนเฉพาะอย่าง

ไอเดียลโปรตีนของสุกรสามารถจำแนกออกจากกัน NRC (1998) ได้จำแนกตามความต้องการของสุกรเพื่อใช้ในการดำรงชีพ และเพื่อการเจริญเติบโต และที่มีในเนื้อเยื่อของสุกร ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สัดส่วนกรดอะมิโนของไอเดียลโปรตีนในสุกร

รายการ	การดำรงชีพ	การเจริญเติบโต	เนื้อเยื่อร่างกาย
ไลซีน	100	100	100
อาร์จินีน	200	48	105
ฮิสทิดีน	32	32	45
ไอโซลิวซีน	75	54	50
ลิวซีน	70	102	109
เมทไธโอนีน	28	27	27
เมทไธโอนีน + ซีสตีน	123	55	45
ฟีนิลอะลานีน	50	60	60
ฟีนิลอะลานีน + ไทโรซีน	121	93	103
ทรีโอนีน	151	60	58
ทริปโตเฟน	26	18	10
วาลีน	67	68	69

ที่มา: NRC (1998)

2.5.2 การประเมินคุณภาพโปรตีนโดยการวิเคราะห์ทางเคมี

เป็นการประเมินคุณภาพโปรตีนโดยไม่ต้องทำการทดลองกับตัวสัตว์ทดลองโดยวัดปริมาณของกรดอะมิโนจำเป็นที่มีในวัตถุดิบหรืออาหารสัตว์ เปรียบเทียบกับปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นที่สัตว์ต้องการ หรือเปรียบเทียบกับกรดอะมิโนในโปรตีนมาตรฐาน ที่มีคุณภาพของโปรตีนสูง เช่น ไข่ หรือนม การประเมินคุณภาพโปรตีนโดยการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ การใช้เอ็นไซม์ย่อยโปรตีนในหลอดทดลอง การวัดค่าเคมีคอล สกอร์ และค่าดัชนีกรดอะมิโนจำเป็น (วชิร, 2546) แต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

1) การใช้เอ็นไซม์ย่อยโปรตีนในหลอดทดลอง (Enzymetic technique) เป็นการประเมินคุณภาพของโปรตีน โดยการใช้เอ็นไซม์ที่พบในระบบทางเดินอาหาร เช่น ทริปซิน (Trypsin) เปปซิน-ไฮโดรคลอริก (Pepsin-HCl) ไคโมทริปซิน (Chymotrypsin) และเปปทิเดส (Peptidase) โดยการใช้เอ็นไซม์เพียงชนิดเดียว หรือหลายชนิดร่วมกัน เพื่อย่อยโปรตีนในวัตถุดิบหรืออาหารสัตว์ที่ต้องการทดสอบ Johnson and Coon (1979) ได้ทำการศึกษาการใช้เปปซินไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 0.002 สามารถแทนการใช้เปปซินความเข้มข้นร้อยละ 0.200 ได้ โดยทำการวัดการย่อยได้ของโปรตีนใน เนื้อ กระดูกป่น และขนไก่ป่น นอกจากนี้ Hsu et al. (1977) ได้หาการย่อยได้ของโปรตีน โดยการใช้เอ็นไซม์ ทริปซิน ไคโมทริปซิน และเอ็นไซม์เปปซินร่วมกันที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.002 ซึ่งพบว่า ใช้เวลาภายในเวลา 1 ชั่วโมง สามารถย่อยโปรตีนได้อย่างสมบูรณ์ และมีความเร็วต่อการตรวจสอบสูง

2) เคมีคอล สกอร์ (Chemical score) การเปรียบเทียบปริมาณของกรดอะมิโนจำเป็นที่มีอยู่ในวัตถุดิบหรืออาหารที่ต้องการทดสอบ กับโปรตีนที่มีคุณภาพของกรดอะมิโนสูง เช่น ไข่ นม หรือรูปแบบของโปรตีน และกรดอะมิโนที่ตั้งขึ้นตามความต้องการของสุกร ดังแสดงในตารางที่ 2-4 ในการเปรียบเทียบปริมาณของกรดอะมิโนที่มีในอาหารหรือวัตถุดิบโปรตีนทดสอบ จะถูกคำนวณให้เป็นร้อยละของโปรตีนของกรดอะมิโนนั้น ๆ ที่มีในแหล่งโปรตีนที่ใช้เปรียบเทียบ ค่าคะแนนที่เป็นร้อยละที่มีค่าต่ำสุดถือเป็นกรดอะมิโนจำกัดตัวที่หนึ่ง เป็นค่าเคมีคอล สกอร์ ของโปรตีนในวัตถุดิบหรืออาหารทดสอบนั้น ๆ ใช้เป็นตัวบ่งบอกให้ทราบถึงคุณภาพโปรตีน เพราะบอกถึงกรดอะมิโนที่ขาดในอาหาร การใช้ค่าดังกล่าวนี้ ในการประเมินคุณภาพโปรตีนยังมีข้อจำกัด เนื่องจากไม่ได้คำนึงถึงกรดอะมิโนอื่น ๆ ที่ขาดแคลนด้วย และค่าที่ได้ไม่สามารถบอกได้ว่าสัตว์จะใช้ประโยชน์ได้ตามที่วิเคราะห์ นอกจากนี้ยังมีความแปรผันตามแหล่งโปรตีนมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบ ทำให้คุณภาพโปรตีนแตกต่างกัน สูตรคำนวณค่าเคมีคอล สกอร์ (Seligson and Mackey, 1984) ดังแสดง

$$\text{ค่าเคมีคอล สกอร์} = \frac{\text{ร้อยละของโปรตีนของกรดอะมิโนในโปรตีนที่ใช้ทดสอบ}}{\text{ร้อยละของโปรตีนของกรดอะมิโนในโปรตีนที่ใช้เปรียบเทียบ}} \times 100$$

ตารางที่ 2-4 ปริมาณของโปรตีนและกรดอะมิโนมาตรฐานที่ใช้คำนวณค่าเคมีคอล สกอร์

โปรตีนและกรดอะมิโน, ร้อยละ	ไข่ทั้งฟอง[1]	ความต้องการของสุกร 20 ถึง 50 กิโลกรัม[2]
โปรตีน	12.90	18.00
อาร์จินีน	0.85 (6.60)[3]	0.33 (1.83)[3]
ฮิสทิดีน	0.31 (2.40)	0.26 (1.44)
ไอโซลิวซีน	0.85 (6.60)	0.45 (2.50)
ลิวซีน	1.14 (8.80)	0.83 (4.61)
ไลซีน	0.83 (6.40)	0.83 (4.61)
เมทไธโอนีน	0.41 (3.14)	0.22 (1.22)
ซีสตีน	0.30 (2.34)	0.25 (1.39)
เมทไธโอนีน + ซีสตีน	0.71 (5.48)	0.47 (2.61)
ฟีนิลอะลานีน	0.75 (5.78)	0.49 (2.72)
ไทโรซีน	0.55 (4.30)	0.29 (1.61)
ฟีนิลอะลานีน + ไทโรซีน	1.30 (10.08)	0.78 (4.33)
ทรีโอนีน	0.64 (4.98)	0.52 (2.89)
ทริปโตเฟน	0.21 (1.65)	0.15 (0.83)
วาลีน	0.69 (7.42)	0.56 (3.11)

ที่มา: [1]Oser (1959); [2]NRC (1998)

หมายเหตุ: [3]**ข้อมูลในวงเล็บ คือ ร้อยละของโปรตีน**

3) ดัชนีกรดอะมิโนจำเป็น (Essential amino acid index) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนของกรดอะมิโนจำเป็นทั้งหมดในอาหารที่ต้องการทำการทดสอบ คุณภาพโปรตีนกับกรดอะมิโนจำเป็นทั้งหมดในโปรตีนมาตรฐาน คือไข่ทั้งฟอง ดัชนีกรดอะมิโนจำเป็นในการคำนวณจะให้ค่าที่มีความถูกต้องมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเคมีคอล สกอร์ อย่างไรก็ตาม ดัชนีกรดอะมิโนจำเป็นยังมีข้อจำกัด คือ ในการคำนวณเป็นการนำกรดอะมิโนจำเป็น 10 ชนิด และใช้ปริมาณกรดอะมิโนฟีนิลอะลานินรวมตัวกับไทโรซีน นอกจากนี้ การใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนไม่ได้เป็นผลจากปริมาณโภชนะเพียงอย่างเดียว อาจเป็นผลจากแหล่งโปรตีนมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบ การย่อยของเอ็นไซม์ และการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายของกรดอะมิโนด้วย (Oser, 1959)

2.5.3 การประเมินคุณภาพโปรตีนโดยการใช้สัตว์ทดลอง

การประเมินคุณภาพโปรตีน เป็นการใช้วิธีต่าง ๆ เพื่อสามารถบ่งบอกถึงคุณค่าของโปรตีนที่มีอยู่ในวัตถุดิบอาหารว่ามีกรดอะมิโนครบถ้วนด้วยปริมาณ ชนิด และสัดส่วนใกล้เคียงกับความต้องการของสัตว์ โปรตีนที่มีคุณภาพดีต้องมีกรดอะมิโนจำเป็นในอาหารครบ การประเมินคุณภาพโปรตีนโดยการใช้สัตว์ทดลองหรือวิธีทางชีววิทยา เป็นการประเมินจากตัวสัตว์ จึงทำให้ได้รายละเอียดเกี่ยวกับคุณภาพ และคุณค่าทางโภชนาการของอาหารที่ถูกต้อง มีหลายวิธีเช่น วัดการย่อยได้ ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน อัตราโปรตีนสุทธิ การใช้ประโยชน์ได้สุทธิของโปรตีน และค่าทางชีวภาพของโปรตีน เป็นต้น (วชิร, 2546) แต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

1) การย่อยได้ของโภชนะ (Digestibility) เป็นการประเมินปริมาณโภชนะแต่ละชนิดที่ถูกย่อยในวัตถุดิบ หรืออาหารสัตว์ หากวัตถุดิบชนิดใดที่ไม่สามารถให้กินเพียงอย่างเดียวได้จำเป็นต้องเติมในอาหารพื้นฐาน และหาค่าการย่อยได้โดยใช้ผลต่างของอาหาร (Partial digestibility) เพื่อคำนวณการย่อยได้ของวัตถุดิบ ซึ่งจะต้องทราบค่าการย่อยได้ของอาหารพื้นฐานก่อน และเมื่อเติมวัตถุดิบทดสอบแล้วนำไปเลี้ยงสัตว์ จะสามารถคำนวณหาค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบทดสอบได้ การย่อยได้ของโภชนะเป็นการประเมิน โดยให้สัตว์กินโภชนะ หรืออาหารทดสอบ และวัดปริมาณอาหาร หรือปริมาณโภชนะ ที่ถูกขับถ่ายออกมาในมูล ส่วนต่างของปริมาณที่กิน และในมูล บ่งบอกถึงปริมาณที่ถูกย่อย และดูดซึมไว้ในร่างกาย (Schneider and Flatt, 1975) แสดงเป็นสัดส่วน หรือสัมประสิทธิ์ของโภชนะที่ย่อยได้ หรือเป็นอัตราร้อยละของการย่อยได้ เช่น วิธีการเก็บมูลทั้งหมด วิธีการใช้สารบ่งชี้ช่วยทดสอบ (Indicator method) แต่ละวิธีการมีทั้งข้อดีและข้อจำกัด ในการนำไปใช้ที่แตกต่างกัน การหาการย่อยได้มีรายละเอียด ดังนี้

วิธีการเก็บมูลทั้งหมด ต้องทราบปริมาณอาหาร หรือปริมาณโภชนะที่แน่นอนและคงที่ ในเวลาที่กำหนดแน่นอน เก็บมูลทั้งหมดที่สุกรขับถ่าย และทำการวิเคราะห์หาปริมาณอาหาร หรือโภชนะที่ต้องการทดสอบในมูล ผลต่างจะเป็นปริมาณโภชนะที่ย่อยได้ การทดสอบโดยวิธีนี้ สัตว์จำเป็นจะต้องมีระยะเวลาการปรับตัว ให้เพียงพอกับอาหารทดสอบ และปัจจัยอื่น ๆ เช่น

สภาพแวดล้อมในการเลี้ยงก่อนทำการเก็บมูล สุกรควรมีระยะเวลาในการปรับตัวประมาณ 5 ถึง 7 วัน (Gralar et al., 1998) นอกจากนี้อาจจะใช้ตัวหมาย (Marker) เพื่อให้แน่ใจว่ามูลที่ถ่ายออกมาเป็นส่วนที่เหลือจากการย่อยอาหารทดสอบ ตัวหมายที่ดีควรเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงอัตราการย่อยอาหาร ไม่มีโภชนะที่ทดสอบประกอบอยู่ ไม่ดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย เช่น โครมิค ออกไซด์ (Chromic oxide) และไททาเนียม ไดออกไซด์ (Titanium dioxide) เป็นต้น ในการหาการย่อยได้ของสิ่งแห้ง สามารถหาได้จากปริมาณสิ่งแห้งที่กิน หักลบด้วยปริมาณสิ่งแห้งในมูล ส่วนการย่อยได้ของไนโตรเจน สามารถหาได้โดยปริมาณไนโตรเจนที่สัตว์กิน หักลบด้วยปริมาณของไนโตรเจน ในมูลสัตว์ที่ขับออก

วิธีใช้สารบ่งชี้ช่วยทดสอบการย่อย โดยให้สัตว์ที่กินอาหารผสมสารบ่งชี้ ในระดับความเข้มข้นที่กำหนด หลังการย่อยและดูดซึมโภชนะ ความเข้มข้นของสารบ่งชี้ในมูลจะเปลี่ยนแปลงโดยเป็นสัดส่วนกับโภชนะที่ถูกย่อยและดูดซึมเหมาะสม กับการทดลองที่ไม่สามารถเก็บมูลได้ทั้งหมด สารบ่งชี้จะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ไม่เป็นพิษ สัตว์ย่อยและดูดซึมไม่ได้ ไม่มีฤทธิ์ หรือรบกวนการทำงานของระบบการย่อยอาหาร มีการเคลื่อนตัวผ่านทางเดินอาหารโดยอัตราสม่ำเสมอ

2) ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน (Protein Efficiency Ratio; PER) เป็นการประเมินคุณภาพโปรตีน และการนำใช้โปรตีนในอาหาร จากอัตราการเจริญเติบโต หรือน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบกับปริมาณโปรตีนที่สัตว์กิน เป็นการประเมินคุณภาพโปรตีนจากสมรรถนะการเจริญเติบโตของสัตว์ทดลอง ข้อเสียของวิธีนี้ คือ เป็นการสมมติว่าในอาหารทั้งหมดถูกใช้สำหรับการเจริญเติบโตทั้งหมด ซึ่งที่จริงแล้วโปรตีนบางส่วนในอาหาร ถูกใช้สำหรับการดำรงชีพ ในการซ่อมแซมเนื้อเยื่อส่วนที่สึกหรอ และค่าที่ได้นี้อาจจะมีความแตกต่างกันเนื่องมาจาก อายุ เพศ ระยะเวลาของการทดสอบ และปริมาณโปรตีน

3) อัตราโปรตีนสุทธิ (Net Protein Ratio; NPR) เป็นการประเมินคุณภาพของโปรตีนที่นำค่าประสิทธิภาพการใช้โปรตีนมาปรับปรุง โดยค่าอัตราโปรตีนสุทธิ ต้องมีการทดสอบให้สัตว์ทดลองได้รับอาหารที่ไม่มีโปรตีนเพิ่มอีกกลุ่มหนึ่ง แล้วนำอัตราการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของน้ำหนักตัวของสัตว์กลุ่มนี้ ลบออกจากค่าประสิทธิภาพการใช้โปรตีน วิธีการนี้จะได้ค่าเพิ่มขึ้นของน้ำหนักตัว ที่ได้จากโปรตีนในอาหารทดสอบจริง เพราะได้หักค่าผิดพลาดของการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักจากสาเหตุอื่น ๆ แล้ว

4) ค่าทางชีวภาพของโปรตีน (Biological Value; BV) การวัดปริมาณไนโตรเจนที่ร่างกายสามารถกักเก็บไว้ เพื่อดำรงชีพ การเจริญเติบโต หรือสร้างเนื้อเยื่อ และสารประกอบต่าง ๆ โดยคิดเป็นร้อยละของไนโตรเจนที่ถูกย่อยและดูดซึมไว้ในร่างกาย ดังนั้นความแตกต่างของการย่อยได้จากโปรตีนแต่ละชนิดจะไม่มีผลกระทบต่อค่านี้ (Crampton and Harris, 1969; Pond et al., 1995) ค่าทางชีวภาพของโปรตีน แสดงถึงปริมาณไนโตรเจนที่สะสมได้ในร่างกายจากปริมาณไนโตรเจนที่ดูดซึม โปรตีนที่มีความสมดุลของกรดอะมิโนที่ดี มีค่าทางชีวภาพ

จริงของโปรตีนสูง สามารถอธิบายถึงความสมดุลของกรดอะมิโนที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย หาก กรดอะมิโนที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย มีความสมดุลของกรดอะมิโนตรงกับความต้องการ มีการใช้ประโยชน์จากกรดอะมิโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการสังเคราะห์โปรตีนมีปริมาณของไนโตรเจนในปัสสาวะต่ำ ค่าทางชีวภาพของโปรตีนมีค่าสูง ซึ่งแสดงว่ามีปริมาณไนโตรเจนที่สะสมได้ในร่างกายสูง จากปริมาณไนโตรเจนที่ดูดซึม หากกรดอะมิโนที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมีความไม่สมดุลของกรดอะมิโน ไม่ตรงกับความต้องการมีการใช้ประโยชน์จากกรดอะมิโนต่ำ ซึ่งกรดอะมิโนที่ไม่ถูกนำมาสังเคราะห์โปรตีนของร่างกาย ถูกกำจัดหมู่อะมิโนออกจากร่างกาย มีปริมาณของไนโตรเจนในปัสสาวะสูง ค่าทางชีวภาพของโปรตีนมีค่าต่ำ ซึ่งแสดงว่ามีปริมาณไนโตรเจนที่สะสมได้ในร่างกายต่ำ จากปริมาณไนโตรเจนที่ดูดซึม

5) การใช้ประโยชน์ได้สุทธิของโปรตีน (Net Protein Utilization; NPU) ในการประเมินคุณภาพของโปรตีน โดยการหาค่าการใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนที่ได้รับ และมีการเก็บสะสมไว้ในร่างกาย โดยพิจารณาค่าการย่อยได้ร่วมด้วย ซึ่งจะมีผลตามชนิด หรือปริมาณที่ได้รับของโปรตีนแต่ละชนิด (Crampton and Harris, 1969) สามารถคำนวณหาการใช้ประโยชน์สุทธิของโปรตีน โดยการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณไนโตรเจนที่ถูกสะสมไว้ในร่างกาย จากปริมาณไนโตรเจนที่กินทั้งหมด หรือค่าทางชีวภาพของโปรตีน คูณด้วยค่าการย่อยได้ของไนโตรเจน เป็นการคำนึงถึงการย่อยได้ของไนโตรเจนจากโปรตีนที่กิน ร่วมกับสมดุลของกรดอะมิโน ที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย จึงสามารถอธิบายถึงปริมาณไนโตรเจนที่ถูกสะสมในร่างกาย จากปริมาณไนโตรเจนที่กินทั้งหมดในอาหาร

2.6 แหล่งของโปรตีนในวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ใช้ในการทดลอง

กากถั่วเหลืองเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันถั่วเหลือง ถั่วเหลืองดิบจะถูกคั่ว หรืออบให้ร้อน บด แล้วหีบ เอาน้ำมัน หรือสกัดน้ำมันด้วยสารละลาย ส่วนที่เหลือคือ กากถั่วเหลือง (สุวิทย์, 2536)

2.6.1 การสกัดน้ำมันจากถั่วเหลือง มีกรรมวิธีในการผลิต (สาโรช, 2547) ดังนี้

1) การแยกโดยวิธีกล (Extracted mechanical) โดยใช้แรงอัดหรือบีบ ให้ความร้อนแก่เมล็ดถั่วเหลือง ถั่วเหลืองที่ถูกอัดน้ำมันออกไปแล้ว จะหลุดออกมาเป็นเกล็ดแบน ๆ ใหญ่บ้างเล็กบ้าง จากนั้นจึงนำไปบด

2) การแยกโดยใช้สารเคมีสกัด (Solvent extraction) การสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยนำถั่วเหลืองที่บด มาสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย คือ เฮกเซน เข้าสกัดน้ำมันจากถั่วเหลืองบด โดยมีความร้อนช่วยในการทำละลาย เมื่อระเหยสารเฮกเซน จะได้น้ำมันถั่วเหลืองดิบ ที่แยกตัวออกจากกาก กากถั่วเหลืองสามารถเก็บไว้ได้นานโดยไม่เหม็นหืน

2.6.2 คุณค่าทางโภชนาการของกากถั่วเหลือง

1) กากถั่วเหลือง มีโปรตีนประมาณร้อยละ 44 ถึง 50 (อำพล, 2545) ผันแปรไปกับกรรมวิธีการสกัดน้ำมัน และปริมาณเปลือกที่แยกออกไป กากถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนจากพืชที่มีคุณภาพสูง มีกรดอะมิโนจำเป็น เกือบครบถ้วน เพียงพอกับ ความต้องการของสัตว์ แต่มีซีสตีนและเมทไธโอนีน ในระดับต่ำ โดยเฉพาะเมทไธโอนีนมีน้อยมาก จึงถูกจัดเป็นกรดอะมิโนจำกัดตัวแรก (First limiting amino acid) (สาโรช, 2547) กรดอะมิโนในโปรตีนของกากถั่วเหลืองมีระดับการใช้ประโยชน์ได้สำหรับสัตว์กระเพาะเดี่ยวสูง คือ ร้อยละ 85 ถึง 92 ปริมาณของกรดอะมิโนในกากถั่วเหลือง (NRC, 1998) ดังแสดงในตารางที่ 2-5

2) เนื่องจากมีเยื่อใยอยู่ต่ำ กากถั่วเหลืองจึงมีพลังงานสูงกว่ากากเมล็ดพืชน้ำมันอื่นมาก คือ อาจมีระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (Metabolizable energy) สำหรับสัตว์กระเพาะเดี่ยว 2.4 ถึง 2.8 เมกะแคลอรี่ต่อกิโลกรัม ผันแปรไปตามระดับของเปลือกที่ถูกแยกออกจากเมล็ดก่อนสกัดน้ำมัน (Ravindran and Blair, 1992)

3) กากถั่วเหลืองมีไขมันตกค้างอยู่ไม่มากนัก มีไขมันอยู่ประมาณร้อยละ 1 ถึง 5 น้ำมันถั่วเหลืองอุดมด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งมีกรดไขมันลิโนเลอิก อยู่ประมาณร้อยละ 50 (NRC, 1994)

4) กากถั่วเหลืองที่สุกไม่พอหรือดิบ จะพบสารยับยั้งการเจริญเติบโต มีอยู่หลายชนิดแต่ที่พบมากคือ สารยับยั้งทริปซิน (Trypsin inhibitor) มีผลต่อการยับยั้ง การย่อยสลาย และการดูดซึมโภชนะ โดยจะยับยั้งการทำงานของน้ำย่อยทริปซิน ชนิดและปฏิกิริยาของสารยับยั้งทริปซิน ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของถั่วเหลือง ถั่วเหลืองที่มีสารยับยั้งทริปซิน จะทำให้การทำงานของน้ำย่อยทริปซินลดต่ำลง และยังมีผลทำให้ตับอ่อนอักเสบ และขยายใหญ่ รวมทั้งระงับการย่อยโปรตีน ที่ลำไส้เล็กด้วยสารยับยั้งทริปซิน ทำการกระตุ้นตับอ่อนให้ผลิตและขับน้ำย่อยออกมาในปริมาณมากเกินความต้องการ และเอ็นไซม์ในน้ำย่อยที่เหลือใช้ ในลำไส้เล็กถูกขับถ่ายออกมาในปริมาณมากกว่าปกติ จะทำให้มีผลกระทบต่อร่างกาย โดยที่ร่างกายต้องมีการเปลี่ยนเมทไธโอนีนให้เป็นซีสตีน สำหรับการสร้างเอ็นไซม์มากขึ้น ทำให้สัตว์ขาดเมทไธโอนีน การเจริญเติบโตหยุดชะงัก (สุวิทย์, 2536)

ตารางที่ 2-5 ปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนของกากถั่วเหลือง

รายการ, ร้อยละ	ทั้งหมด[1]	ย่อยได้ปรากฏ[2]	ย่อยได้จริง[2]
โปรตีน	43.8	-	-
อาร์จินีน	3.23 (7.37)[3]	2.94 (6.71)	3.00 (6.85)
ฮิสติดีน	1.17 (2.67)	1.01 (2.30)	1.05 (2.40)
ไอโซลิวซีน	1.99 (4.54)	1.67 (3.81)	1.75 (3.40)
ลิวซีน	3.42 (7.81)	2.87 (6.56)	3.01 (6.87)
ไลซีน	2.83 (6.46)	2.41 (5.49)	2.52 (5.75)
เมทไธโอนีน	0.61 (1.39)	0.52 (1.20)	0.56 (1.26)
ซิสตีน	0.70 (1.60)	0.54 (1.23)	0.59 (1.34)
เมทไธโอนีน + ซีสตีน	1.31 (2.99)	1.06 (2.43)	1.15 (2.60)
ฟีนิลอะลานีน	2.18 (4.98)	1.85 (4.23)	1.92 (4.38)
ไทโรซีน	1.69 (3.86)	1.45 (3.32)	1.52 (3.47)
ฟีนิลอะลานีน + ไทโรซีน	3.87 (8.84)	3.30 (7.55)	3.44 (7.85)
ทรีโอนีน	1.73 (3.95)	1.35 (3.08)	1.47 (3.36)
ทริปโตเฟน	0.61 (1.39)	0.49 (1.11)	0.53 (1.21)
วาลีน	2.06 (4.70)	1.67 (3.81)	1.77 (4.04)

ที่มา: [1] NRC(1998)

หมายเหตุ: [2] คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของ NRC (1998)

[3] ข้อมูลในวงเล็บ คือ ร้อยละของโปรตีน